

STUDIUM REAKCÍ TEKUTÉ LITINY S FORMOVACÍ SMĚSÍ NA BÁZI PORTLANDSKÉHO CEMENTU

STUDY OF INTERACTION OF LIQUID GREY IRON AND PORTLAND CEMENT MOULDS

L. TOMEK¹, K. RUSIN²

ABSTRACT: Technologies and materials used in industry are still more influenced by ecological aspects and demands. In foundries, the use of resins as a binder in moulds worsens the working conditions due to toxic combustions products emitted during pouring. The second serious problem is the needed recyclability of the used moulds, because until now, 70% of this material is disposed. This paper presents the results of the investigation of new hydraulically setting binders in foundry moulds with contact of liquid grey iron. These binders based on alumina and Portland cements are environmentally friendly and exhibiting admirable performance. Methodology of trials was designed and its attestation was implemented in experimental and working conditions. In the interface between cement sands and liquid metal there were certified generation of complex allied substances - on the base Si, Fe, Al and Ca. In many cases FeS has been found. All these compounds are illustrated by SEM microscopy. The mathematical model of mechanical penetration has been created and proved influence of the temperature and chemical composition of grey iron on the range of penetration in the experimental moulds. The research and development of these inorganic binders for the foundry use will be the solution for future no waste technologies.

KEYWORDS: Iron, Casting, Mould, Cement, Sand, Interaction

1 ÚVOD

Výroba jakostních odlitků vyžaduje, aby povrch odlitku byl hladký a bez povrchových vad. Jedna z těchto vad je způsobena penetrací kovu do slévárenské pískové formy. Výsledkem reakcí na rozhraní formy a kovu, v závislosti na stupni proniknutí kovu, mohou tedy být tyto povrchové vady: povrchová drsnost, připečeniny a zapečeniny. Tyto mohou mít významný vliv na snížení mechanických vlastností, zvláště pak na únavovou životnost. Jejich vliv může vést i ke zhoršení obrobitelnosti odlitků [1].

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Mechanismy penetrace

V publikacích kolektivu amerických autorů [2, 3, 4] jsou popsány mechanismy vzniku, příčiny, parametry kovu a formy, které mají vliv na vznik penetrace u litinových odlitků. O několik let později se tento kolektiv věnoval problematice penetrace i u ocelových odlitků [5, 6, 7]. Autory, kteří se zabývají touto problematikou, jsou prokázány následující způsoby penetrace kovu do slévárenské pískové formy:

- Mechanická penetrace
- Chemická penetrace

¹ Brno University of Technology, Institute of Mechanical Technology

² Brno University of Technology, Institute of Mechanical Technology

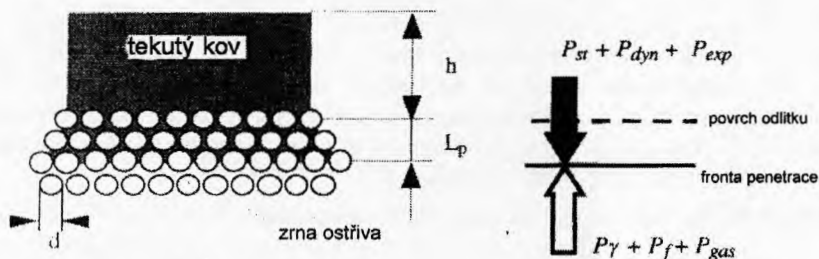
- Penetrace účinkem par kovů
- Explosivní penetrace
- Expanzní penetrace
- Penetrace iniciovaná cristobalitickou expanzí [8, 9]

2.2 Mechanická penetrace

Kov může vstupovat do prostoru pórů ve formě za působení metalostatického, metalodynamického tlaku nebo působením kapilárních sil. Platí rovnice tlakové rovnováhy (1) na rozhraní forma-tekutý kov [2]:

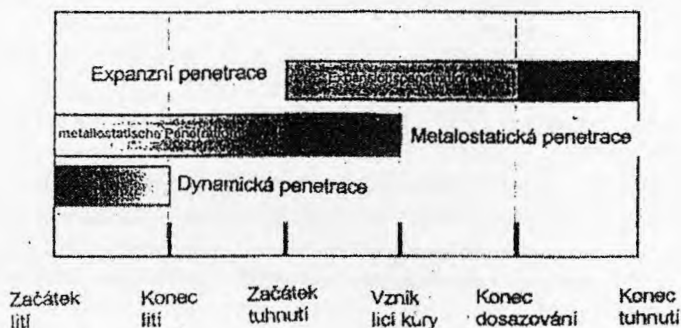
$$P_{st} + P_{dyn} + P_{exp} = P_{\gamma} + P_f + P_{gas} \quad (1)$$

| | |
|--------------|--|
| P_{st} | metalostatický tlak |
| P_{dyn} | dynamický tlak |
| P_{exp} | expanzní tlak |
| P_{γ} | kapilární tlak |
| P_f | tlaková ztráta třením při pohybu kovu v pórech |
| P_{gas} | tlak plynů ve formě |



Obrázek 1: Princip porušení tlakové rovnováhy na rozhraní kov-forma [2].

Levá strana rovnice (1) vyjadřuje tlaky v tekutém kovu, pravá strana odpor nebo naopak podporu pronikání kovu do formy. Je třeba uvést, že expanzní tlak působí pouze u grafitizujících litin (u oceli tedy na levé straně rovnice vystupuje P_{st} a P_{dyn}). Tlaky na pravé straně rovnice nepůsobí vždy všechny. Jejich působení během lití a tuhnutí je znázorněno na Obr.2.



Obrázek 2: Časový průběh působení mechanismů mechanické penetrace [10].

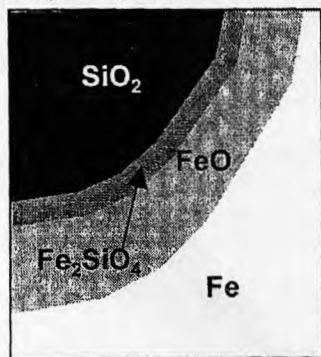
Největší vliv na pravé straně rovnice (1) má kapilární tlak. Ten závisí především na úhlu smáčení, povrchovém napětí a na průměru pórů mezi zrna formovací směsi. Ostatní členy na pravé straně

rovnice (1) dosahují podstatně nižších hodnot než kapilární tlak. Autoři [2] uvádějí že při měření tlaku plynů ve formách různých směsí bylo dosahováno rozmezí 1-1,25 atm. Třecí odpor závisí na délce penetrace (délce toku kovu), viskozitě taveniny, rychlosti proudění a na pórovitosti formy.

2.3 Chemická penetrace

Nedávné výzkumy z USA tvrdí, že chemická penetrace probíhá jen u ocelových odlitků, zatímco u litinových odlitků se uplatňuje pouze mechanická penetrace [5]. Autory [2] bylo prokázáno, že oxidace probíhá v pořadí C-Si-Mn-Fe. To znamená, že uhlík je přednostně oxidován před železem a tak brání jeho oxidaci.

Při rozboru reakcí na povrchu formy po nalití kovu je nutné uvažovat s účinkem atmosféry ve formě. Především je důležitý poměr CO k CO₂. Zvýší-li se koncentrace CO₂, dochází k výrazné oxidaci kovu. Toto bylo potvrzeno v práci [5], kdy bylo zjištěno, že čím víc má atmosféra formy oxidační charakter, tím více probíhá chemická penetrace. Další výzkum ukázal, že atmosféra na rozhraní forma-kov při odlévání ocelových odlitků závisí na druhu pojiva, zvláště na obsahu uhlíku a vlhkosti se směsí [6]. Na rozdíl od litinových odlitků, které jsou chráněny vysokým obsahem C v kovu, je ocel náchylná k chemické penetraci, i když se významným způsobem změní atmosféra formy. Stejný výzkumný tým zjistil [7], že u uhlíkových ocelí je možný obojí způsob penetrace, chemická i mechanická. Když se objeví mechanická penetrace, neprobíhají mezi kovem a pískem žádné reakce. V případě chemické penetrace se vytváří blízko kovové matrice vrstvička FeO a v blízkosti křemenného písku vrstvička fayalitu (Obr.3). Penetrovaný kov bývá oduhlíčen.



Obrázek 3: Charakteristické oblasti při vzniku chemické penetrace [9].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bylo navržení zkušebního odlitku, na kterém se bude vyhodnocovat vliv tekuté litiny s lupínkovým grafitem na penetraci do cementových forem. Provedena byla experimentální a provozní tavba s cílem ověřit funkčnost zkoušky. U každé tavby byly výsledky porovnány s matematickým modelem mechanické penetrace.

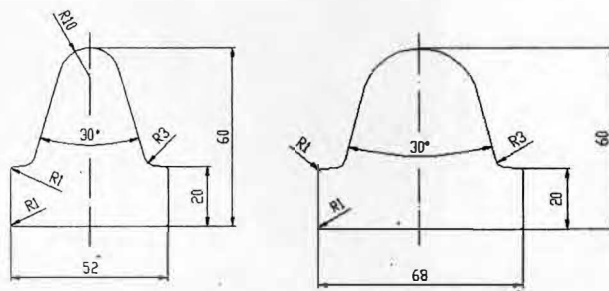
3.1 Tvar zkušebního tělesa a jader

1. Zkušebním tělesem byl válec o průměru 120 mm a výšce 150 mm.
2. K prodloužení doby tuhnutí tvořila vnější obálku válce sibalová (tepelná) izolace, v níž byly vytvořeny prostory pro uložení jader (Obr.4).
3. Do sibalové izolace byla v polovině výšky založena klínová jádra s rozdílnými poloměry zaoblení z důvodu dosažení rozdílných teplotních podmínek (Obr.5). Jádra byla rozložena po obvodu rovnoměrně vždy po 90°. Dvojice jader se stejným poloměrem zaoblení byly založeny vždy proti sobě.
4. Zvýšení metalostatického tlaku bylo docíleno použitím nálitku stejného průměru jako má zkušební odlitek. Vnější obálku nálitku opět tvořila sibalová (tepelná) izolace.



Obrázek 4: Tepelná izolace zkušební tělesa.

Při návrhu jader byl zachován základní tvar, který použil při své zkoušce Jelínek [8]. To znamená, že byla navržena klínová jádra s vrcholovým úhlem 30° a dvěma rozdílnými poloměry zaoblení špičky (R10, R20). Nicméně po zmenšení zkušební odlitku byla i jádra proporcionálně zmenšena (Obr.5).



Obrázek 5: Navržené rozměry jader.

3.2 Experimentální tavba

a) Složení směsi a vlastnosti:

Ostrivo - 82,5%, Portlandský cement 42,5N - 10%, H_2O - 4%, Dextrin - 1,5%, $CaCl_2$ - 2%, po vytvrzení směsi měla jádra pevnost v tlaku 1,63 MPa, prodyšnost po 24 hodinách 200 n.j.p. V jaderníku byla vyrobena celkem 4 jádra.

b) Výroba formy

Do bentonitové formovací směsi byl ručně zaformován jeden zkušební odlitek, tzn. jedna sibalová izolace se založenými jádry a další izolace tvořila nálitok. Ten byl koncipován jako atmosférický. Vtoková soustava byla vytvořena tak, aby lití probíhalo spodem (klidné plnění bez dynamického tlaku). Zářez, který plnil zkušební odlitek, byl přiveden pod úhlem 45° k hlavním osám jader.

c) Tavení a lití

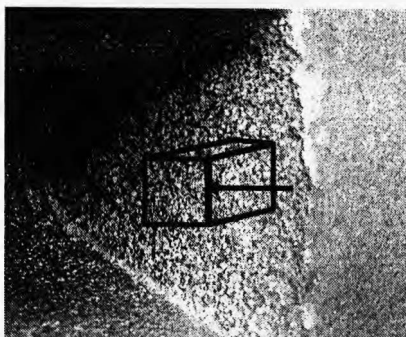
Tavení kovu probíhalo v elektrické indukční peci s kyselou vyzdívkou. Kapacita kovu v peci je 40kg. Odlévána byla EN - GJL- 350. Před vlastním odlitím byl odlit do kovové formy vzorek na rozbor. Ten byl proveden na opticko emisním spektrometru s doutnavým výbojem SPECTRUMAT GDS-750. Výsledky jsou průměrné ze tří měření (Tab.1). Forma byla odlévána 46 hod od vyrobení jader. Teplota lití byla $1302^\circ C$ (měřena ponorným termočlánekem).

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Cu | Mg |
|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| 2,97 | 1,76 | 0,21 | 0,068 | 0,043 | 0,05 | 0,107 | 0,000 |

Výsledky spektrální analýzy použitého kovu.

d) Příprava vzorků

Z odlitku byly odebrány 3 vzorky. Vždy ve směru kolmém k povrchu odlitku (Obr.6), aby bylo možno sledovat interakce forma-kov. Vzorky byly zalisovány a na jejich povrchu připraveny metalografické výbrusy konvenčním postupem, tj. broušením za mokra na brusných papírech, leštěním diamantovými pastami.



Obrázek 6: Místo odběru vzorků.

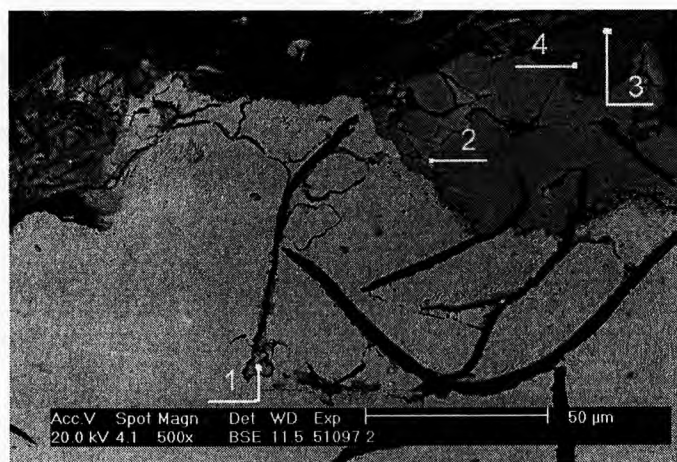
e) Analýza rozhraní forma-kov. Studium a fotodokumentace struktury byly provedeny na rastrovacím elektronovém mikroskopu PHILIPS XL 30 v zobrazovacím módu BSE (zpětně odražených elektronů). Lokální chemické analýzy byly provedeny metodou EDS (energieově dispersním spektrometrem).

| Popis analýzy | | Prvek | | | | | | | | |
|---------------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| č.snímku | místo | Cu [%] | S [%] | O [%] | Al [%] | Si [%] | Cl [%] | K [%] | Ca [%] | Fe [%] |
| 51097 | 1 | 1,15 | 49,90 | | | | | | | 48,95 |
| 51097 | 2 | | 46,05 | | | | | | | 53,95 |
| 51097 | 3 | | | 56,28 | | | | | | 43,72 |
| 51097 | 4 | | | 60,39 | 1,69 | 20,05 | 0,76 | 2,20 | 1,67 | 13,23 |

Na snímku 51097 v místech 1 a 2 byl analyzován FeS, v místě 3 oxid na bázi železa, a v místě 4 se jedná o komplexní oxid na bázi křemíku a železa s malým zastoupením prvků Al, Cl, K a Ca.

| Popis analýzy | | Prvek | | | | | | |
|---------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| č.snímku | místo | O [%] | Al [%] | Si [%] | S [%] | Ca [%] | Ti [%] | Fe [%] |
| 51107 | 1 | | | 7,90 | 39,88 | | 1,02 | 51,20 |
| 51107 | 2 | 55,65 | 1,95 | 11,86 | 4,51 | 0,85 | 0,39 | 24,80 |

Snímek 51107 zachycuje pohled na zrna křemenného ostřiva, které je nataveno k základnímu materiálu. V místě 1 byl analyzován FeS s malým podílem Si a Ti. V místě 2 komplexní oxid na bázi železa a křemíku s podílem S, a menším množstvím Al, Ca a Ti.



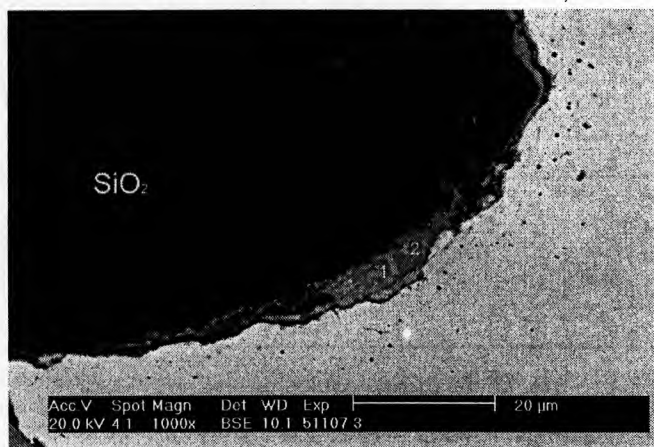
Obrázek 7: Snímek 51097.



| Prvek | [%] |
|-------|-------|
| S | 47,81 |
| Fe | 52,19 |

Obrázek 8, snímek 51101 a jeho analýza.

V místě 1 na snímku 51101 můžeme pozorovat větší množství vzniklých FeS.



Obrázek 9, snímek 51107.

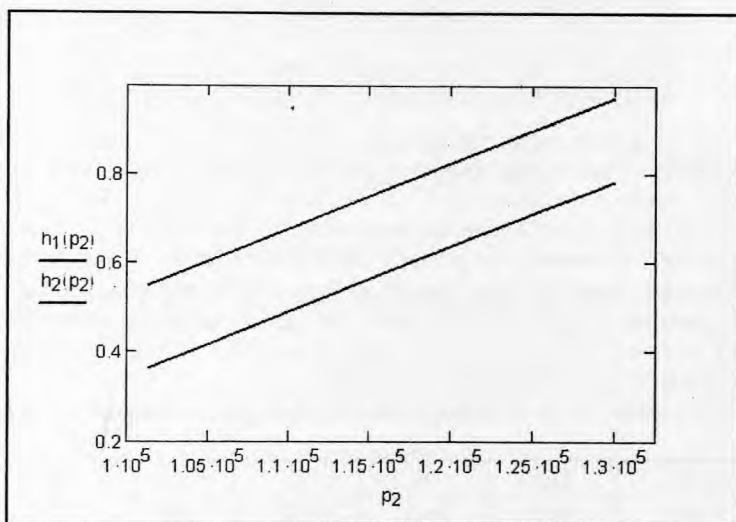
Shrnutí analýzy rozhraní:

Lze říci, že při odlévání do cementové formovací směsi s portlandským cementem, probíhají na rozhraní formy a kovu chemické reakce za vzniku komplexních oxidů na bázi křemíku, železa a hliníku. Zarážející je velký výskyt FeS. Ten je pravděpodobně způsoben obsahem $\text{Ca}(\text{SO})_4$ v cementu. Síran vápenatý je přidáván buď ve formě sádrovce nebo jako anhydrit. Má funkci zpomalovače tuhnutí cementu tím, že váže rychle tuhnoucí alit. Prvky jako Si, Al, Ca a Fe mohou být uvolňovány tepelným rozkladem z produktů hydratace cementu.

f) Matematický model

Byl vytvořen zjednodušený model mechanické penetrace v programu Mathcad. Tento model uvažoval vliv teploty a chemického složení dané litiny. Byla použita rovnice pro výpočet úhlu smáčení z [2] a [3]. Autoři [3] uvádějí, že tato rovnice byla sestavena pro následující rozsah podmínek (chemického složení a lící teploty):

3,04 – 3,67% C; 1,74 – 2,41% Si; 0,07 – 0,71% Mn; 0,03 – 0,13% P; 0,01 – 0,14% S a lící teplotu v rozsahu 1300 – 1400°C.



Obrázek 10: Grafické znázornění $h=f(p_2)$.

Na Obr. 10 je grafické znázornění $h=f(p_2)$ pro formovací směs s velikostí zrna $d_{50}=0,248$ mm (horní přímká) a $d_{50}=0,376$ mm (spodní přímká). Autoři [2] uvádějí že při měření tlaku plynů ve formách různých směsí bylo dosahováno rozmezí 1-1,25 atm. Tlak plynů ve formě byl uvažován i v tomto modelu a jelikož jsme neprováděli žádná měření tlakového režimu u cementových formovacích směsí, tak jsme použili mezní tlaky od autorů [2]. Pro dolní mez to byla 1atm (101300 Pa) a pro horní mez 1,25 atm (130000 Pa). S rostoucím tlakem plynů pochopitelně roste i kritická výška kovu.

Shrnutí výsledků matematického modelu:

Po vyčíslení kritických výšek pro mezní tlaky jsme dostali nejnižší hodnotu 36,3 cm sloupce kovu. Tato hodnota je pro atmosférický tlak a pro velikost zrna $d_{50}=0,376$ mm. Pokud si uvědomíme, že uspořádání experimentu bylo: výška nálitku 15cm, plus polovina výšky válce k ose jádra (7,5 cm), tak se dostáváme na hodnotu 22,5 cm sloupce kovu. I kdybychom uvažovali výšku obou izolačních válců (výška jednoho válce byla 15cm), tak se dostáváme na hodnotu 30cm. I tato hodnota je menší než kritická výška 36,3 cm. Je patrné, že k mechanické penetraci by nemělo vůbec dojít.

3.3 Provozní tavba

Příprava jader probíhala na VUT FSI, v pískové laboratoři odboru Slévárenství. Tavení, lití, vytloukání odlitků a částečně jejich řezání bylo provedeno ve slévárně FERAMO METALLUM INTERNATIONAL s.r.o.

Konečné úpravy, jako čištění a řezání, byly opět provedeny ve školních laboratořích.

a) Složení směsi a vlastnosti:

Ostřivo - 82,5%, Portlandský cement 42,5N - 10%, H₂O - 4%, Dextrin - 1,5%, CaCl₂ - 2%
V jaderníku byla vyrobeno celkem 8 jader a 4 z nich byla namočena v nátěru Koalid 4087 LS.

b) Výroba formy

Do bentonitové formovací směsi byly ručně zaformovány dva zkušební odlitky. U každého z nich těleso tvořila jedna sibalová izolace se založenými jádry a další dva izolační válce na sobě tvořily náletek. Ten byl opět koncipován jako atmosférický. Vtoková soustava byla vytvořena tak, aby lití probíhalo spodem (klidné plnění bez dynamického tlaku). Zářez, který plnil zkušební odlitek, byl přiveden pod úhlem 45° k hlavním osám jader.

c) Tavení a lití

Ve slévárně FERAMO METALLUM INTERNATIONAL s.r.o. přípravu tekutého kovu zajišťují dvě horkovětrné kupolové pece s odprášením o průměru tavicího pásma 1000 mm s automatickým systémem zavážení vsázky a výkonem cca 7,5 t/hod. Kov byl do pánve přelit z 12 tunové elektrické udržovací pece PIKS, která slouží k homogenizaci tekutého kovu. Odlévána byla EN – GJL - 200. Spektrální analýza byla provedena na přístroji SPECTRO (Tab.5). Forma byla odlita 8 dnů od výroby jader. Čas odlití formy byl 24s a teplota lití byla 1467°C (měřena pyrometrem).

Teplota lití je poměrně vysoká, nicméně autor [11] uvádí, že při vysokých licích teplotách (nad 1450°) dochází ke zmenšení nebezpečí vzniku vměstků v odlitku. Je možné, že právě toto je záměr ve slévárně FERAMO METALLUM INTERNATIONAL s.r.o.

Nicméně je také možné, že se jednalo pouze o technologickou nekázeň ze strany pracovníků ve slévárně.

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Cu | Mg |
|------|------|------|------|-------|------|------|----------|
| [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| 3,41 | 2,08 | 0,54 | 0,09 | 0,055 | 0,05 | 0,08 | < 0,0002 |

Výsledky spektrální analýzy tekutého kovu.

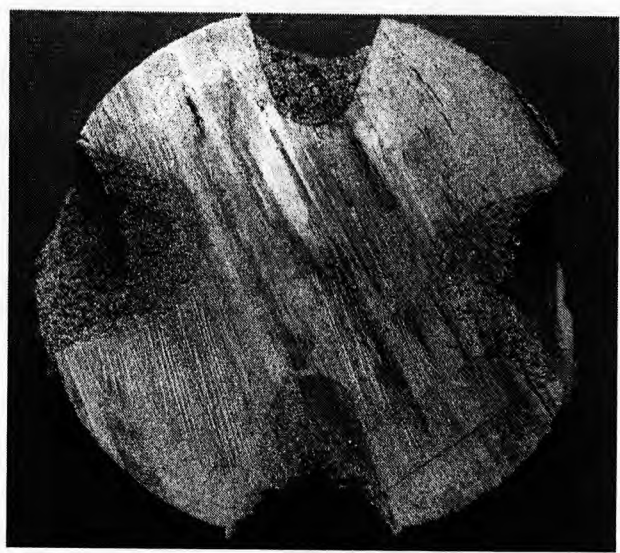
d) Vyhodnocení provozní tavby

Po převozu zkušebních odlitků na FSI bylo zkoušeno, zda bude možné cementovou formovací směs po tepelné expozici odvrátat nebo vysekat sekáčem. Tento postup byl zcela neúčinný a proto bylo přistoupeno k otryskání zkušebních odlitků. Vnitřní prostor všech dutin byl u obou zkušebních odlitků téměř zaplněn. Nebylo zřejmé, zda došlo k tak rozsáhlé penetraci, nebo zda se jádra během lití urvala, výplavala a prostor dutin tak byl zaplněn pouze kovem. Byl tedy rozřezán jeden zkušební odlitek v polovině výšky dutin. Bylo zjištěno, že opravdu došlo k velmi rozsáhlé a hluboké penetraci (Obr.11). Pokud by se jednalo o kov, neexistovala by tak zřetelná hranice mezi zkušebním odlitkem a vnitřním prostorem dutiny. Jelikož se jedná o kovokeramickou hmotu, která je těžko oddělitelná, nebylo již přistoupeno k analýzám rozhraní forma-kov.

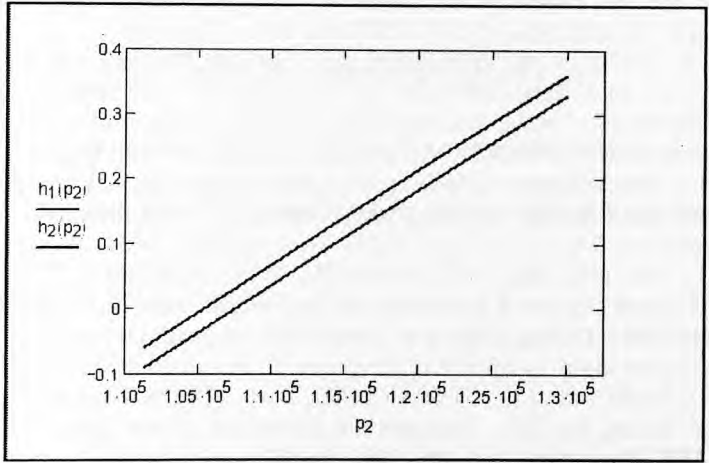
d) Matematický model

Tak jako v případě experimentální tavby, tak i tentokrát byl vytvořen zjednodušený model mechanické penetrace v programu Mathcad, kalkulující s chemickým složením odlévaného materiálu a teplotou lití.

Na Obr.12 je grafické znázornění $h=f(p_2)$ pro formovací směs s velikostí zrna $d_{50}=0,248$ mm (spodní přímka) a $d_{50}=0,376$ mm (pozn. horní přímka).



Obrázek 11: Řez zkušebním odlitkem.



Obrázek 12: Grafické znázornění $h=f(p_2)$.

Shrnutí výsledků matematického modelu:

Po vyčíslení kritických výšek pro mezní tlaky dostáváme nejvyšší hodnotu 36,1 cm sloupce kovu. Tato hodnota je pro tlak 1,25 atm a pro velikost zrna $d_{50}=0,376$ mm (Šajdíkovy Humence). Pokud si uvědomíme, že uspořádání u každého zkušebního odlitku bylo: výška nálitku 30cm, plus polovina výšky válce k ose jádra (7,5 cm), tak se dostáváme na hodnotu 37,5 cm sloupce kovu. Záměrně je na porovnání uvažována nejvyšší kritická výška i přesto, že u cementových směsí se neočekává takový tlak při vývinu plynů. Při výpočtu je použit nejvyšší tlak (1,25 atm) plynů z formy, které brání kovu proniknutí do formy. Pokud tedy porovnáme tyto dvě hodnoty: vypočtená kritická výška 36,5 cm a skutečná výška 37,5 cm, je patrné, že již od samého počátku byl kov do mezizrnových prostor nasáván, což potvrzuje výsledek uskutečněné provozní tavby.

4 ZÁVĚR

V rámci experimentální tavby byla provedena analýza rozhraní forma-kov, která potvrdila vznik chemických sloučenin na tomto rozhraní. Konkrétně se jednalo o komplexní oxidy na bázi křemíku, železa a hliníku. Výrazný a častý byl výskyt síranů, př. sírníků železa. Jejich vznik bude pravděpodobně souviset s CaSO_4 (síran vápenatý), který je přidáván do portlandského cementu jako zpomalovač tuhnutí. Vliv této přísady je problematický a může negativně ovlivnit charakter struktury v povrchových vrstvách litiny s kulčkovým grafitem. Proto je žádoucí se tímto problémem i nadále zabývat.

Vytvořený matematický model v programu Mathcad prokázal vliv teploty lití a chemického složení tekuté litiny. S rostoucí teplotou a rostoucím obsahem uhlíku v tekuté litině se zvětšuje riziko mechanické penetrace. Výrazný je i vliv velikosti zrna formovací směsi d_{50} . Pokud je úhel smáčení větší než 90° je z hlediska mechanické penetrace výhodnější použití menší velikosti d_{50} . Pokud je úhel smáčení menší než 90° je z hlediska mechanické penetrace naopak výhodnější použití větší velikosti d_{50} .

5 ODKAZY

- [1] NARO, R.L., WALLACE, J.F. Effect of Mold-Steel Interface Reactions on Casting Surface. AFS Transactions, 1992, vol.100, č.95, s. 797-820.
- [2] STEFANESCU, D.M., GIESE, S.R., PIWONKA, T.S., LANE, A.M. Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part I: Physics of Penetration Defects and Penetration Model. AFS Transactions, vol. 104, 1996, 96-206, s. 1233-1248.
- [3] GIESE, S.R., STEFANESCU, D.M., BARLOW, J., PIWONKA, T.S. Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part II: Experimental Evaluation of Some Main Parameters Responsible for Penetration. AFS Transactions, vol. 104, 1996, 96-207, s. 1249-1257.
- [4] PATTABHI, R., LANE, A.M., PIWONKA, T.S. Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part III: Measurements of Mold-Metal Interfacial Gas Composition. AFS Transactions, vol. 104, 1996, 96-208, s. 1259-1264.
- [5] STEFANESCU, D.M., OWENS, M.D., LANE, A.M., PIWONKA, T.S., HAYES, K.D., BARLOW, J.O. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds, Part I: Physics and Chemistry of Penetration and Mathematical Modeling-Metal Side. AFS Transactions, vol. 109, 2001, 01-058, s. 1347-1363.
- [6] LANE, A.M., OWENS, M.D., STEFANESCU, D.M., PIWONKA, T.S., BARLOW, J.O., HAYES, K.D. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds, Part II: Chemical Reactions at the Mold/Metal Interface During Casting of Steel. AFS Transactions, vol. 109, 2001, 01-057, s. 1327-1345.
- [7] HAYES, K.D., BARLOW, J.O., STEFANESCU, D.M., PIWONKA, T.S. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds, Part III: Experimental Evaluation of the Metal – Molding Aggregate Interaction. AFS Transactions, vol. 109, 2001, 01-083, s. 1365-1378.
- [8] JELÍNEK, P., PAWLAS, P. Vliv par kovů a cristobalitické expanze na vznik hlubokých zapečenin u ocelových odlitků. Slévárenství, 1988, roč. 36, č. 10, s. 412-421.
- [9] SVOBODA, J. M. Mechanisms of Metal Penetration in Foundry Molds. AFS Transactions, 1969, č. 281-288.
- [10] NEUDERT, A., DUDA, J. Penetrace kovu do forem ze syrových bentonitových směsí. Vady odlitků IV.-Výběr přednášek ze semináře, Česká slévárenská společnost pobočka Kopřivnice, 2000, s. 12/1-12/8.
- [11] ROUČKA, J. a kol. Filtrace tavenin, 1.vydání 2000, ISBN 80-02-01389-1.

Príspevek pro Mezinárodní konferenc Spolupráce 2009 byl zpracován z experimentů projektu GAČR č.106/08/0270.